

УДК 621.923

**В.М. ТОНКОНОГИЙ**, д-р техн. наук;  
**О.В. РИБАК**, Одеса, Україна

## **ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ШЛІФУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ ПРИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ**

Для постановки задачі вибору технологічних параметрів шліфування плазмових покриттів розглянуто низку умов, що гарантують необхідну якість обробленої поверхні. Критерії оптимальності визначені на основі аналізу продуктивності процесу обробки, а також втрат матеріалу покриття на припуски. Згідно з побудованою математичною моделлю процесу шліфування, представлено цільові функції, варіативні параметри та систему обмежень для даної задачі.

**Ключові слова:** багатокритеріальна оптимізація, математична модель, шліфування, плазмові покриття, критерії оптимальності, технологічні параметри.

Для постановки задачи выбора технологических параметров шлифования плазменных покрытий рассмотрено ряд условий, гарантирующих необходимое качество обработанной поверхности. Критерии оптимальности определены на основе анализа производительности процесса обработки, а также потерь материала покрытия на припуски. Согласно построенной математической модели процесса шлифования, представлены целевые функции, вариативные параметры и система ограничений для данной задачи.

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, математическая модель, шлифование, плазменные покрытия, критерии оптимальности, технологические параметры.

A number of conditions that ensure quality of the processed surface are considered in order to state a problem of technological parameters selection for plasma coatings grinding process. Optimum criteria are determined on the basis of the analysis of processing productivity and allowance loss of coating material. Objective functions, variable parameters and the system of constraints are presented according to the mathematical model of the grinding process.

**Keywords:** multi-objective optimization, mathematical model, grinding, plasma coatings, optimum criteria, technological parameters.

### **Вступ**

Одним з найбільш ефективних способів модифікації робочих поверхонь деталей є нанесення плазмових покриттів. На сьогоднішній день плазмові покриття набувають значного розповсюдження, оскільки велика частина вимог, що висуваються до готових виробів, визначається властивостями їхнього поверхневого шару, і тому використання дорогих та дефіцитних матеріалів для виробництва всієї деталі зазвичай виявляється недоцільним. За рахунок використання матеріалів з наперед заданою структурою та фізико-механічними властивостями можна не лише знизити вартість виробництва, але й покращити експлуатаційні характеристики деталей завдяки поєднанню особливостей матеріалів покриття та основи.

Постановка задачі оптимізації технологічного процесу зазвичай ґрунтується на мінімізації вартості, досягненні максимальної продуктивності та найкращої якості обробленої поверхні. При шліфуванні деталей через надмірне збільшення температури, а також локальні та залишкові напруження у зоні контакту зі шліфувальним кругом виникає ризик утворення поверхневих та структурних дефектів, таких як магістральні тріщини, сколювання, припали та вириви внаслідок налипання оброблюваного матеріалу на абразивний інструмент. Крім того, для деталей з плазмовим покриттям існує можливість його відшаровування та відриву від основного матеріалу. Зазначені дефекти спричиняють непридатність подальшого використання отриманих виробів, що, в свою чергу, призводить до економічних збитків.

Таким чином, при виборі параметрів процесу шліфування плазмових покриттів слід враховувати велику кількість умов. Система обмежень, що гарантують якість обробленої поверхні, включатиме не лише показники, які впливають на розвиток дефектів, але й вимоги щодо заданої точності та шорсткості готової деталі. Для деталей з нанесеним покриттям необхідно також брати до уваги пористість покриття та його міцність зчеплення з основою. Зважаючи на високу вартість напилених матеріалів, потрібно зменшити втрату матеріалу на припуски. Відтак, побудована математична модель враховуватиме характеристики матеріалу покриття, шліфувального круга та режимів обробки, частина з яких є заданими величинами, а інші – параметрами оптимізації для даної задачі.

**Мета роботи** полягає у постановці задачі визначення оптимальних технологічних параметрів процесу шліфування плазмових покриттів, за яких досягається максимальна продуктивність обробки при мінімальних втратах матеріалу покриття на припуски і забезпечується необхідна якість поверхні.

#### **Аналіз попередніх досліджень і публікацій**

У низці робіт, присвячених задачі оптимізації процесу шліфування, була зроблена спроба визначення найбільш ефективних параметрів шліфування за допомогою методів лінійного та геометричного програмування, градієнтних методів та методу множників Лагранжа [1–3]. Проте через нелінійність та складність математичної моделі визначення оптимального режиму шліфування, традиційні способи розв'язку даної задачі виявилися недостатньо ефективними. Тому останнім часом набирають популярності різноманітні метаевристичні алгоритми, такі як методи пошукової оптимізації, поведінкові алгоритми та алгоритми, надихнуті природою [4]. У роботі [5] запропонована математична модель багатокритеріальної оптимізації, що включає загальну вартість, продуктивність процесу та кінцеву якість обробленої поверхні. Для цього у якості змінних розглянуто швидкість шліфувального круга, швидкість подачі та параметри правки шліфувального круга, а постановка та розв'язок задачі реалізовані в межах квадратичного

програмування. На базі цієї математичної моделі у роботі [6] було виконано пошук оптимальних значень параметрів шліфування за допомогою генетичного алгоритму, який показав кращі результати у порівнянні з попередніми методами. Робота [7] присвячена застосуванню мурашиного алгоритму оптимізації, що виявився досить ефективним для задачі вибору параметрів процесу шліфування. Серед останніх досліджень слід відзначити роботи [8 – 10], що вивчають можливість адаптації методу рою часток для розв'язку даної задачі. Інші публікації [11 – 13] присвячені створенню математичних моделей, що враховують вплив температурних чинників на процес обробки поверхні та динамічним характеристикам системи під час шліфування.

### Основна частина

Задача оптимального проектування технологічної системи в загальному вигляді зводиться до вибору таких вхідних параметрів об'єкту проектування, при яких досягається найкраще значення критерію оптимальності, визначене на основі вихідних параметрів проектованої системи. Щоб отримати найкраще рішення для технологічного процесу, в якому слід враховувати велику кількість факторів, зазвичай приймають декілька критеріїв, що впливають на ефективність системи, і задача оптимізації стає багатокритеріальною. Постановка та розв'язок такої задачі відбувається за алгоритмом, зображеним на рис. 1.

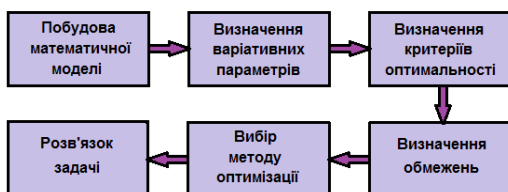


Рисунок 1 – Постановка та розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації

В якості критеріїв оптимальності технологічного процесу шліфування плазмових покриттів розглядатиметься продуктивність обробки деталей з покриттям

$$P \rightarrow \max \quad (1)$$

та величина припуску на шліфування

$$\delta \rightarrow \min . \quad (2)$$

Продуктивність процесу шліфування в загальному вигляді визначається об'ємом матеріалу, знятого в одиницю часу:

$$P = \frac{V_m}{\tau}, \quad (3)$$

де  $V_m$  – загальний об'єм знятого матеріалу;  $\tau$  – час обробки.

Для плоского шліфування загальний об'єм знятого матеріалу можна представити як

$$V_m = a \cdot b \cdot \sum_{i=1}^N h_i, \quad (4)$$

де  $a$  – довжина оброблюваної деталі;  $b$  – її ширина;  $h_i$  – глибина шліфування при  $i$ -му проходженні.

Час обробки деталі можна розрахувати за формулою:

$$\tau = \frac{L \cdot (Z + b + \Delta) \cdot k_T}{1000 \cdot v_{lon} \cdot v_{tr}}, \quad (5)$$

де  $Z$  – ширина шліфувального круга;  $L$  – довжина ходу столу з деталлю;  $\Delta$  – величина перебігу з бокових сторін;  $v_{lon}$  – швидкість поздовжньої подачі;  $v_{tr}$  – швидкість поперечної подачі;  $k_T$  – коефіцієнт точності (зазвичай у межах 1,2 ... 1,5).

Підставивши (4) та (5) у (3), отримаємо формулу для визначення продуктивності шліфування:

$$P = \frac{a \cdot b \cdot 1000 v_{lon} \cdot v_{tr} \cdot \sum_{i=1}^N h_i}{L \cdot k_T \cdot (Z + b + \Delta)}. \quad (6)$$

Загальний об'єм матеріалу, що відводиться на припуски і буде знятий в процесі шліфування:

$$\delta = \sum_{i=1}^N h_i \cdot n_i, \quad (7)$$

де  $n_i$  – кількість проходжень з заданою глибиною шліфування.

Отже, керуючими параметрами розглянутої системи є швидкості поздовжньої та поперечної подачі, а також глибина шліфування, яка може змінюватись в процесі обробки покриття. Критерії оптимальності можна визначити наступним чином:

$$Z_1 = \max \left\{ \frac{1000 \cdot a \cdot b}{L \cdot k_T \cdot (Z + b + \Delta)} \cdot v_{lon}^j \cdot v_{tr}^k \cdot \sum_{i=1}^N h_i \right\}, \quad j = \overline{1, M}; \quad k = \overline{1, \Psi}; \quad (8)$$

$$Z_2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^N h_i \cdot n_i \right\}. \quad (9)$$

Шорсткість обробленої поверхні  $R_a$  зазвичай задається певним числовим значенням  $R_a^*$ , якого необхідно досягти в процесі шліфування:

$$R_a \leq R_a^*. \quad (10)$$

Технологічні параметри та параметри правки шліфувального круга мають значний вплив на формування шорсткості поверхні, величину якої можна розрахувати, виходячи з товщини утвореної стружки  $H_{ch}$ :

$$R_a = \begin{cases} 0,46 \cdot \sqrt[3]{H_{ch}}, & \text{при } 0 < H_{ch} \leq 0,254 \\ 0,79 \cdot \sqrt[3]{H_{ch}^2}, & \text{при } 0,254 < H_{ch} \leq 2,54 \end{cases}; \quad (11)$$

$$H_{ch} = 12,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt{d_z} \cdot \sqrt[3]{v_{lon}^2}}{\sqrt[3]{D}} \cdot \sqrt{v_{pr}} \cdot \left( 1 + \frac{d_{pr}}{v_{pr}} \right) \cdot \sqrt{\left( \frac{v_d}{v_{kp}} \right)}, \quad (12)$$

де  $D$  – діаметр шліфувального круга;  $d_z$  – розмір зерен абразиву;  $v_d$  – швидкість деталі;  $v_{kp}$  – швидкість шліфувального круга;  $d_{pr}$ ,  $v_{pr}$  – параметри правки шліфувального круга.

Згідно з [14], міцність зчеплення покриття з основою  $\theta_{adh}$  можна визначити за формулою:

$$\theta_{adh} = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} \cdot \sqrt{E_a \cdot G}, \quad (13)$$

де  $h$  – товщина покриття;  $E_a$  – поверхнева енергія на межі розподілу покриття і основи;  $G$  – модуль пружності. Енергія адгезії на межі двох фаз:

$$E_a = (\cos \phi + 1) \cdot \sigma_{ed}, \quad (14)$$

де  $\phi$  – крайовий кут змочування;  $\sigma_{ed}$  – поверхневий натяг.

Щоб не допустити розриву адгезійних зв'язків та відриву покриття від основи, адгезійна міцність зчеплення повинна бути більшою за напруження, що руйнують зчеплення:

$$\theta_{adh} > \sigma_y. \quad (15)$$

Теплова енергія, що виділяється у зоні контакту шліфувального круга з оброблюваною поверхнею, стає причиною зростання температури деталі. Якщо розглядати теплову модель процесу шліфування як наслідок руху теплового джерела площиною напівнескінченного фізичного тіла [15, 16], розподіл температури з глибиною від поверхні шліфування може бути представлений у вигляді:

$$T = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\zeta \cdot q \cdot \sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha\tau}\right) - \frac{qx}{\lambda} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right), \quad (16)$$

де  $x$  – глибина від поверхні шліфування;  $\zeta$  – коефіцієнт, що дорівнює відношенню теплового потоку, поглинутого оброблюваною поверхнею, до загального теплового потоку  $q$  в зоні шліфування;  $\lambda$  – теплопровідність оброблюваного матеріалу;  $\rho$  – його густина;  $c$  – теплоємність;  $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності.

Попередити утворення шліфувальних припалень на поверхні дозволяє обмеження:

$$T(x) \leq T_{\max} \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (17)$$

Розвитку тріщин при шліфуванні покриттів можна запобігти, якщо локальні напруження

$$\sigma = 2G \frac{1 + \mu_{II}}{1 - \mu_{II}} \alpha_i T \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) \quad (18)$$

будуть обмежені граничними значеннями [17]:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) \leq \sigma_{\lim}. \quad (19)$$

Тут  $\mu_{II}$  – коефіцієнт Пуассона;  $\alpha_i$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Якщо структура покриття є неоднорідною, а його пористість перевищує 8 – 10 %, зростає ризик утворення тріщин в матеріалі покриття. В такому випадку слід враховувати критерій локального руйнування [16]:

$$\ell_0 < \frac{D \cdot \alpha \cdot \lambda^2 \cdot v_d \cdot K_c}{\pi^2 \left[ C \cdot v_{kp} \cdot G \cdot (1 + \mu_{II}) \cdot \alpha_t \cdot \left( 1 - \exp \left( \frac{v_d \sqrt{Dh_i}}{\alpha \tau} \right) \right) \right]}, \quad (20)$$

де  $\ell_0$  – характерний лінійний розмір дефекту структури;  $C$  – вміст абразивних зерен у шліфувальному крузі;  $K_c$  – тріщиностійкість даного покриття.

Відтак, задача вибору технологічних параметрів шліфування плазмових покриттів полягає у визначенні таких значень поздовжньої та поперечної швидкості подачі, а також глибини шліфування, при яких досягаються найкращі значення критеріїв оптимальності (8), (9). Інші параметри обираються з переліку значень, що містяться в базі даних побудованої на основі математичної моделі шліфування плазмових покриттів інформаційної системи, та для кожного конкретного випадку оптимізації є сталими величинами. Якість обробленої поверхні забезпечують умови (10), (15), (17), (19), (20), які разом з обмеженнями можливих значень діапазону варіативних параметрів, формують систему обмежень оптимізаційної задачі.

### Висновки

Постановка задачі визначення оптимальних параметрів шліфування плазмових покриттів ґрунтується на аналізі характеристик матеріалу покриття, шліфувального круга та режимів обробки. Критеріями оптимальності для даної задачі було прийнято продуктивність обробки деталей з покриттям та величину припуску на шліфування, а досягнення заданої шорсткості враховано у вигляді умови забезпечення якості поверхні. В результаті вивчення факторів, які можуть спричинити утворення дефектів, до системи обмежень включено граничні умови для максимальної температури та напружень, що виникають при взаємодії оброблюваної деталі зі шліфувальним кругом. Таким чином, задача вибору технологічних параметрів процесу шліфування плазмових покриттів є багатокритеріальною оптимізацією з розгорнутою системою обмежень та граничних умов.

**Список використаних джерел:** 1. *Malkin S.* Selection of operating parameters in surface grinding of steels / *S. Malkin* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1976. – Vol. 98, Is. 1. – pp. 56-62. 2. *Gopalakrishnan B.* Machine parameter selection for turning with constraints: an analytical approach based on geometric programming / *B. Gopalakrishnan, A.K. Faiz* // *International Journal of Production Research*, 1991. – Vol. 29 (9)– pp. 1897-1908. 3. *Agapiou J.S.* The optimization of machining operations based on a combined criterion. Part 1: The use of combined objectives in single pass operations / *J.S. Agapiou* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1992. – Vol. 114, Is. 4. – pp. 500-507. 4. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / *А.П. Карпенко* – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с. 5. *Wen X.M.* Micro-computer-based optimization of the surface grinding process / *X.M. Wen, A.A.O. Tay, A.Y.C. Nee* // *Journal of Materials Processing Technology*, 1992. – Vol. 29 (1-3). – pp. 75-90. 6. *Saravanan R.* A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations / *R. Saravanan, P. Asokan, M. Sachidanandam* // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002. – Vol. 42, no. 12. – pp. 1327-1334. 7. *Baskar N.* Ants colony algorithm approach

for multi-objective optimisation of surface grinding operations / *N. Baskar, R. Saravanan et al.* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004. – Vol. 23, no. 5. – pp. 311-317. **8. Pawar P.J.** Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm / *P.J. Pawar, R.V. Rao, J.P. Davim* // Materials and Manufacturing Processes, 2010. Vol. 25, Is. 6. – pp. 424-431. **9. Zhang G.** Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm / *G. Zhang, M. Liu et al.* // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. Vol. 71, Is. 9-12. – pp. 1861-1872. **10. Lin X.** Enhanced Pareto particle swarm approach for multi-objective optimization of surface grinding process / *X. Lin, H. Li* // Proceedings of the Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2008. – Vol. 2. – pp. 618-623. **11. Malkin S.** Thermal aspects of grinding. Part 2: Surface temperatures and workpiece burn / *S. Malkin* // ASME Journal of Engineering for Industry, 1974. – Vol. 96, Is. 4. – pp. 1184-1191. **12. Thompson R.A.** The Dynamic Behavior of Surface Grinding / *R.A. Thompson* // ASME Journal of Engineering for Industry, 1971. – Vol. 93, Is. 2. – pp. 485-497. **13. King R.I.** Handbook of Modern Grinding Technology / *R.I. King, S. Hahn* – London: Chapman and Hall, 1986. – 360 p. **14. Костюк Г.И.** Оценка адгезионных характеристик контактирующих материалов с покрытиями / *Г.И. Костюк, О.М. Мелкозерова* // Авиационно-космическая техника и технология, 2011. – Вып. 3 (80). – с. 16-22. **15. Jaeger J.C.** Moving sources of heat and temperature at sliding contacts / *J.C. Jaeger* // Proceedings: Royal Society – New South Wales, 1942. – Is. 76. – с. 203-224. **16. Усов А. В.** Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию : дис. д-р. техн. наук / *А. В. Усов*. – К., 1991. – 426 с. **17. Усов А.В.** Розробка САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів / *А.В. Усов, В.М. Тонконогий, О.В. Рибак* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – с. 84.

**Bibliography (transliterated):** **1. Malkin S.** Selection of operating parameters in surface grinding of steels / *S. Malkin* // ASME Journal of Engineering for Industry, 1976. – Vol. 98, Is.1. – pp. 56-62. **2. Gopalakrishnan B.** Machine parameter selection for turning with constraints: an analytical approach based on geometric programming / *B. Gopalakrishnan, A.K. Faiz* // International Journal of Production Research, 1991. – Vol.29 (9)– pp. 1897-1908. **3. Agapiou J.S.** The optimization of machining operations based on a combined criterion. Part 1: The use of combined objectives in single pass operations / *J.S. Agapiou* // ASME Journal of Engineering for Industry, 1992. – Vol. 114, Is. 4. – pp. 500-507. **4. Karpenko A.P.** Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdohnovlennyye prirodoj / *A.P. Karpenko – M.: Izdatel'stvo MG TU im. N.Je. Bauman, 2014. – 446 s.* **5. Wen X.M.** Micro-computer-based optimization of the surface grinding process / *X.M. Wen, A.A.O. Tay, A.Y.C. Nee* // Journal of Materials Processing Technology, 1992. – Vol. 29 (1-3). – pp. 75-90. **6. Saravanan R.** A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations / *R. Saravanan, P. Asokan, M. Sachidanandam* // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002. – Vol. 42, no. 12. – pp. 1327-1334. **7. Baskar N.** Ants colony algorithm approach for multi-objective optimisation of surface grinding operations / *N. Baskar, R. Saravanan et al.* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004. – Vol. 23, no. 5. – pp. 311-317. **8. Pawar P.J.** Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm / *P.J. Pawar, R.V. Rao, J.P. Davim* // Materials and Manufacturing Processes, 2010. Vol. 25, Is. 6. – pp. 424-431. **9. Zhang G.** Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm / *G. Zhang, M. Liu et al.* // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. Vol. 71, Is. 9-12. – pp. 1861-1872. **10. Lin X.** Enhanced Pareto particle swarm approach for multi-objective optimization of surface grinding process / *X. Lin, H. Li* // Proceedings of the Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2008. – Vol. 2. – pp. 618-623. **11. Malkin S.** Thermal aspects of grinding. Part 2: Surface temperatures and workpiece burn / *S. Malkin* // ASME Journal of Engineering for Industry, 1974. – Vol. 96, Is. 4. – pp. 1184-1191. **12. Thompson R.A.** The Dynamic Behavior of Surface Grinding / *R.A. Thompson* // ASME Journal of Engineering for Industry, 1971. – Vol. 93, Is. 2. – pp. 485-497. **13. King R.I.** Handbook of Modern Grinding Technology / *R.I. King, S. Hahn* – London: Chapman and



Hall, 1986. – 360 p. **14.** *Kostjuk G.I.* Ocenka adgezionnyh harakteristik kontaktirujushhih materialov s pokrytijami / *G.I. Kostjuk, O.M. Melkozerova* // *Aviaciono-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2011. – Vyp. 3 (80). – s. 16-22. **15.** *Jaeger J.C.* Moving sources of heat and temperature at sliding contacts / *J.C. Jaeger* // *Proceedings: Royal Society – New South Wales*, 1942. – Is. 76. – s. 203-224. **16.** *Usov A. V.* Povyshenie jeffektivnosti processa bezdefektnogo shlifovanija materialov i splavov, predraspolzhenykh k treshhinoobrazovaniju : dis. d-r. tehn. nauk / *A. V. Usov*. – K., 1991. – 426 s. **17.** *Usov A.V.* Rozrobka SAPR tehnologichnogo procesu shlifuvannja plazmovih pokryttiv / *A.V. Usov, V.M. Tonkonogij, O.V. Ribak* // *Vazhke mashinobuduvannja. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materiali XVI mizhnarodnoï naukovo-tehnichnoï konferencii*. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – s. 84.